

## ИЗУЧЕНИЕ КИНЕТИКИ СОРБЦИИ ПРОМЫШЛЕННОГО КРАСИТЕЛЯ КАТИОННОГО РОЗОВОГО 2С ГЛИНИСТЫМ МАТЕРИАЛОМ

А.П. Афолина, О.В. Бурькина

Анастасия Павловна Афолина (ORCID 0009-0005-9437-1244)\*, Оксана Владимировна Бурькина (ORCID 0000-0003-3023-8207)

Кафедра фундаментальной химии и химической технологии, Юго-Западный государственный университет, ул. 50 лет Октября, 94, Курск, Российская Федерация, 305040

E-mail: madamafonina@gmail.com\*, buoksana@yandex.ru

*Целью исследования является изучение кинетики процесса сорбции катионного розового 2С глинистым материалом Брянской области, а также влияния модификации глинистого сорбента на кинетику сорбции выбранного красителя. Сорбцию катионного розового 2С глинистым материалом проводили методом статической одноступенчатой сорбции. Концентрация использованного раствора красителя составляла 0,5 г/л, масса сорбента 1 г, скорость вращения мешалки 600 об/мин, время сорбции меняли от 5 до 30 мин с интервалом 5 мин. Остаточную концентрацию катионного розового 2С определяли с помощью спектрофотометра ПА-5400 УФ при длине волны 546 нм относительно растворителя. Активацию глинистого материала проводили 0,1н. растворами соляной кислоты и гидроксида натрия, время обработки составляло 30 мин. Лимитирующую стадию процесса сорбции катионного розового 2С исходным и модифицированными образцами глины определяли графоаналитическим методом. Порядок и константу скорости реакции определяли по времени полупревращения. Полученные графические зависимости степени сорбции от времени контакта сорбент - сорбат показали, что кислотная и щелочная обработка не влияют на вид кинетической кривой изучаемого процесса сорбции, однако положительно сказывается на скорости достижения сорбционного равновесия и проценте сорбции. Графоаналитическим методом было определено, что процесс сорбции красителя не модифицированным образцом глины протекает в смешанно-диффузионном режиме, порядок реакции равен 1,4, константа скорости составляет  $1,07 \cdot 10^{-2}$  л/г·с. При кислотной активации происходит смена режима протекания процесса со смешанно-диффузионного на внутридиффузионный, порядок реакции при этом становится 1,34, а константа скорости увеличивается в два раза. Щелочная обработка глинистого материала не влияет на смену режима протекания процесса, константа скорости составляет 1,32 л/г·с константа скорости реакции увеличивается в 1,5 раза. Полученные результаты показывают, что химическая модификация глинистого материала приводит к увеличению скорости сорбции.*

**Ключевые слова:** кинетика, сорбция, глина, очистка сточных вод, сорбционная способность, константа скорости, порядок процесса сорбции, катионный розовый 2С, диффузия

## STUDY OF THE KINETICS OF SORPTION OF INDUSTRIAL DYE CATIONIC PINK 2C BY CLAY MATERIAL

A.P. Afonina, O.V. Burykina

Anastasia P. Afonina (ORCID 0009-0005-9437-1244)\*, Oksana V. Burykina (ORCID 0000-0003-3023-8207)

Department of Fundamental Chemistry and Chemical Technology, Southwest State University, 50 let Oktyabrya st., 94, Kursk, 305040, Russia

E-mail: madamafonina@gmail.com\*, buoksana@yandex.ru

*The aim of the study is to study the kinetics of the sorption process of cationic pink 2C with clay material of the Bryansk region, as well as the effect of modification of the clay sorbent on the sorption kinetics of the selected dye. Sorption of cationic pink 2C with clay material was carried out by static single-stage sorption. The concentration of the dye solution used was 0.5 g/l. The mass of the sorbent was 1 g. The speed of rotation of the agitator was 600 rpm. The sorption time was changed from 5 to 30 min with an interval of 5 min. The residual concentration of cationic pink 2C was determined using a PA-5400 UV spectrophotometer at a wavelength of 546 nm relative to the solvent. Activation of the clay material was carried out by 0.1 N solutions of hydrochloric acid and sodium hydroxide. The processing time was 30 min. The limiting stage of the sorption process of cationic pink 2C with the original and modified clay samples was determined out by graphoanalytic method. The order and the reaction rate constant were determined by the time of half-conversion. The obtained graphical dependences of the degree of sorption on the time of sorbent-sorbate contact showed that acid and alkaline treatment do not affect the type of kinetic curve of the sorption process under study, but the rate of sorption equilibrium and the percentage of sorption have a positive effect. Graphoanalytically, it was determined that the process of sorption of the dye by an unmodified clay sample proceeds in a mixed-diffusion mode. The reaction order is 1.4. The rate constant is  $1.07 \cdot 10^{-2}$  l/g·s. With acid activation, the process mode changes from mixed-diffusion to intradiffusion. The reaction order becomes 1.34, and the rate constant is doubled. Alkaline treatment of clay material does not affect the change in the process mode, the rate constant is 1.32 l/g·s, the reaction rate constant increases by 1.5 times. The results obtained show that chemical modification of clay material leads to an increase in the sorption rate.*

**Key words:** kinetics, sorption, clay, wastewater treatment, sorption capacity, rate constant, sorption process order, cationic pink 2C, diffusion

**Для цитирования:**

Афолина А.П., Бурькина О.В. Изучение кинетики сорбции промышленного красителя катионного розового 2С глинистым материалом. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2023. Т. 66. Вып. 9. С. 123–128. DOI: 10.6060/ivkkt.20236609.6775.

**For citation:**

Afonina A.P., Burykina O.V. Study of the kinetics of sorption of industrial dye cationic pink 2C by clay material. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2023. V. 66. N 9. P. 123–128. DOI: 10.6060/ivkkt.20236609.6775.

## ВВЕДЕНИЕ

Многие предприятия и коммунальные объекты сталкиваются с проблемой очистки сточных вод. [1, 2]. Красильно-отделочные предприятия, использующие при крашении окислительные красители, представляют серьезную опасность для объектов гидросферы. Сточные воды этих предприятий могут иметь еще более интенсивную окраску, чем красильные растворы, т.к. в них, помимо красителя, могут содержаться вещества, образующиеся при взаимодействии красителя и текстильного материала. Кроме того, в сточных водах содержатся другие вещества органического и минерального происхождения, такие как ПАВ, азот аммонийный, сульфиды, фосфаты, взвешенные вещества, сухой остаток и т.д. [3]. Химические загрязнители, попадая в водные объекты, нарушают естественные процессы самоочистки воды и ухудшают санитарное состояние водоемов. Окрашен-

ные сточные воды влияют на кислотный режим водоема и замедляют процесс самоочистки, ухудшается светопрозрачность, вследствие адсорбции солнечного света хромофорными и аукохромыми группами молекулы красителя, в результате нарушается процесс фотосинтеза. Наличие красителей приводит к повышению минерализации природных вод. Увеличение минерализации сказывается на органолептических свойствах воды, а также угнетает биохимическую жизнь в водоеме. Биоразрушение красителей в естественных условиях может проходить с образованием токсичных веществ, которые оказывают губительное воздействие на флору водоемов: животных, птиц, рыб. При концентрации красителя в воде более 0,1 мг/дм<sup>3</sup> затрудняются процессы аммонификации и нитрификации, существенно изменяется ее кислородный режим, ХПК, БПК<sub>5</sub>. Предельная концентрация красителя, не тормозящая процессы самоочистки воды, составляет менее 0,001 мг/дм<sup>3</sup>.

Применение сорбционного метода для очистки сточных вод, содержащих органические и неорганические примеси, позволяет очищать производственные стоки с эффективностью 95% без применения каких-либо химических веществ. Оборудование, используемое при сорбционной очистке сточных вод, отличается простотой конструкции и возможностью автоматизации технологического процесса, что значительно упрощает и удешевляет процесс очистки [4]. Очистка сточной воды предполагает не только защиту окружающей среды, но и безопасность технологического процесса [5].

В последнее время для очистки сточных вод все больше используются сорбенты естественного происхождения [6-9], а также отходы промышленных производств [10-13]. Для очистки от красителей рекомендуется использовать минеральные сорбенты, в частности меловые породы и глинистые минералы: каолинит, смектит, иллит-монтмориллонит, вермикулит-хлорити другие в виде порошков [14].

Эффективность сорбента зависит от развитости площади поверхности и присутствия активных центров по отношению к загрязнениям сточных вод [15]. Скорость процесса адсорбции обусловлена скоростью диффузии растворенного вещества к поверхности сорбента через пленку жидкости, которая окружает частицы сорбента. Скорость диффузии увеличивается перемешиванием реакционной смеси. Сорбцию катионного розового 2С глинистым материалом проводили методом одноступенчатой статической сорбции.

#### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для исследования был взят глинистый материал Брянской области, деревни Осотское с глубины 1,5 метра. По химическому составу исследуемый глинистый материал можно отнести к жирным каолинам. Гранулометрический состав используемого образца однороден: фракции размером  $< 0,01$  мм составляет 83% от массы образца, из этого количества 32% приходится на фракцию  $< 0,001$  мм. Используемый сорбционный материал имеет удельную поверхность  $3,11 \text{ м}^2/\text{г}$ , удельный объем пор  $0,003 \text{ см}^3/\text{г}$ , насыпная плотность  $1,35 \text{ кг}/\text{дм}^3$ .

Образцы глины промыли водой для удаления загрязнений, высушили до постоянной массы, просеяли через лабораторное сито с диаметром ячейки 0,5 мм и поместили в бюкс для предотвращения контакта с воздухом. Для анализа использовали фракцию с  $d < 0,5 \text{ мм}$ .

Глину, массой 1 г, помещали в емкость лабораторной установки для проведения статической сорбции [6-7, 11, 16]. К навеске сорбента приливали 50 мл 0,5 г/л раствора красителя катионного розового 2С. Сорбцию проводили при комнатной температуре, при перемешивании (скорость вращения мешалки 200 об/мин), варьируя время контакта сорбента с сорбатом от 5 до 30 мин с шагом 5 мин. После окончания времени сорбции растворы отфильтровывали и проводили определение остаточной концентрации красителя в фильтрате фотометрическим методом, методом калибровочного графика [11]. Фотометрирование проводили с помощью спектрофотометра ПЭ-5400 УФ при  $\lambda = 546 \text{ нм}$  относительно дистиллированной воды. Сорбционную способность  $\Gamma$  (%) рассчитывали по формуле, приведенной в [16].

Для изучения влияния модификации сорбента на сорбционные параметры глины использовали обработку глинистого материала неорганическими веществами. При кислотной активации образцы глины обрабатывали 0,1н раствором HCl в течение 30 мин, отфильтровывали, промывали водой и высушивали.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При действии кислоты наблюдалось незначительное уменьшение массы образца глины за счет растворимых в HCl компонентов минерала. Красно-коричневый цвет глины переходит в желто-оранжевый, а раствор кислоты приобретает зеленоватый цвет, что можно объяснить растворением полупрозрачного оксида железа. При щелочной активации образцы глины обрабатывали 0,1 н раствором NaOH в течение 30 мин, отфильтровывали, промывали и высушивали. При этой обработке в глине происходили фазовые превращения, сопровождающиеся разрушением кристаллической структуры природного алюмосиликата и образованием новой твердой фазы со структурой цеолитового типа [17].

С помощью катионных красителей окрашивают полиакрилонитрильные нити, которые используются при замене шерстяных волокон или как добавка к ним. Краситель катионный розовый 2С относится ко второму типу катионных красителей (с положительным зарядом в хромофорной части молекулы), и при крашении полиакрилонитрильного волокна дают разные оттенки красного.

Катионный розовый 2С (хлорид 1,3,3-триметил-2-[4-(N-метил-N,2-хлорэтиламино)-стирел]индолина) имеет химическую формулу  $[\text{C}_{22}\text{H}_{26}\text{ClN}_2]^+\text{Cl}^-$  и представляет собой фиолетовый

порошок с молекулярной массой равной 289 г/моль, хорошо растворимый в метаноле, этаноле, ацетоне и других органических растворителях, а также в воде. Ранее [11] было выявлено, что катионный розовый 2С хорошо адсорбируется органическим сорбентом – древесными опилками.

По полученным данным были построены кинетические кривые для немодифицированного образца глины (рис. 1, кр. 1) и модифицированного кислотой (рис. 1, кр. 2) и щелочью (рис. 1, кр. 3).

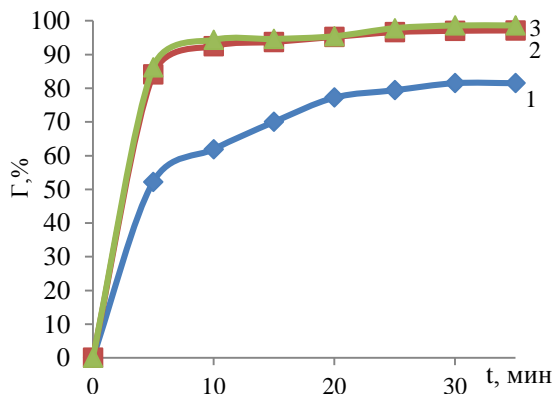


Рис. 1. Кинетические кривые сорбции катионного розового 2С необработанной глиной (1) и обработанной: 0,1 н раствором HCl (2); 0,1 н NaOH (3)

Fig. 1. Kinetic sorption curves of cationic pink 2 with untreated clay (1) and treated with: 0.1 n HCl (2) solution; 0.1 n NaOH (3)

На кинетической кривой сорбции красителя не обработанной глиной видно, что впервые 5 мин сорбции наблюдается резкое увеличение процента сорбции красителя образцом глины, но по мере заполнения вакантных адсорбционных мест происходит насыщение сорбента красителем [18] и процент сорбции остается постоянным при увеличении времени более 30 мин.

Сравнение кинетических кривых не модифицированной глины (рис. 1, кр. 1) и модифицированной (рис. 1, кр. 2 и 3) показало, что модификация не влияет на вид кинетической кривой. Во всех случаях процесс сорбции протекает достаточно быстро на начальном этапе, далее происходит насыщение сорбента красителем, образуется плато. Однако модификация положительно сказывается на скорости сорбции. Так сорбционное равновесие при использовании не модифицированной глины достигается за 30 мин, а при модификации время установления сорбционного равновесия сокращается до 20 мин при обработке кислотой и до 15 мин при действии на глину щелочи. Кроме того, химическая модификация положительно сказывается на сорбционной способности глинистого материала, увеличивая ее с 81,5% до 98,6%.

Для определения лимитирующей стадии процесса сорбции красителя катионного розового 2С образцами глинистого материала использовали графоаналитический метод [19]. Для этого построили зависимости  $\ln(1 - F) = f(t)$  для внешне диффузионной кинетики (рис. 2) и  $F = f(t^{1/2})$  для внутридиффузионной кинетики (рис. 3).

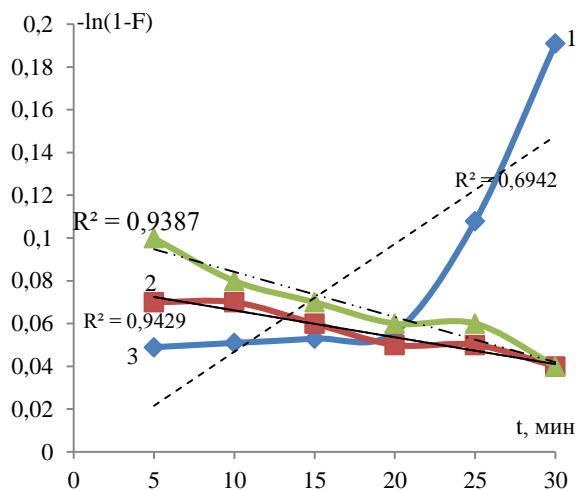


Рис. 2. Внешнедиффузионная кинетика сорбции красителя не обработанной глиной (1), обработанной: 0,1 н HCl (2), 0,1 н NaOH (3)

Fig. 2. External diffusion kinetics of sorption of dye with not treated clay (1), treated with: 0.1 n HCl (2), 0.1 n NaOH (3)

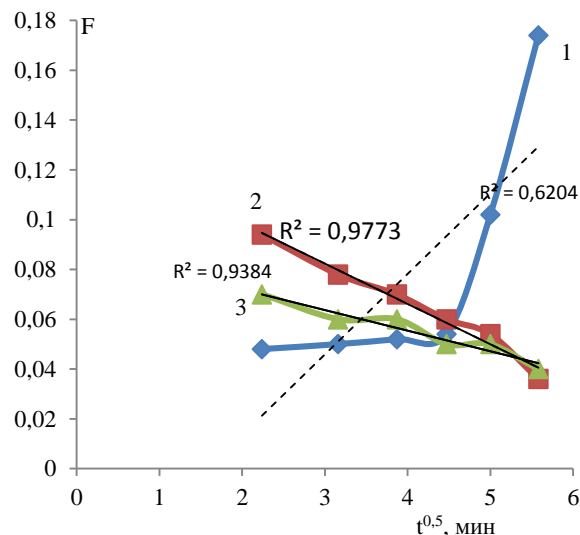


Рис. 3. Внутридиффузионная кинетика сорбции красителя не обработанной глиной (1), обработанной: 0,1 н HCl (2), 0,1 н NaOH (3)

Fig. 3. Intradiffusion kinetics of dye sorption with not treated clay (1), treated with: 0.1 n HCl (2), 0.1 n NaOH (3)

Анализ полученных кривых для не модифицированной глины (рис. 2, кр. 1 и рис. 3, кр. 1) показал, что коэффициенты линейной корреляции для обеих зависимостей принимают значения

выше среднего: для внешней диффузии 0,6942, для внутренней диффузии 0,6204. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что процесс сорбции протекает в смешанно-диффузионном режиме, т.е. сорбция контролируется диффузией в пленке раствора на границе раздела жидкой и твердой фаз и непосредственно в фазе сорбента [20].

Анализ полученных кривых для модифицированных образцов показал, что при сорбции красителя глинистым материалом, обработанным кислотой, коэффициент линейной корреляции кривой, соответствующей внешней диффузии (рис. 2, кр. 2), составляет 0,6942, а для внутренней диффузии (рис. 3, кр. 3) – 0,9687. Следовательно, лимитирующей стадией в данном случае является внутренняя диффузия – скорость сорбции зависит от диффузии сорбатива внутрь сорбента.

Щелочная обработка не влияет на смену лимитирующей стадии, поскольку полученные линейные коэффициенты корреляции для внешней диффузии (рис. 2, кр. 3) равен -0,9782 и 0,9865- для внутренней диффузии (рис. 3, кр. 3) принимают близкие значения, следовательно, смешанно-диффузионный режим процесса сорбции сохраняется, как и для не модифицированной глины.

Для выявления порядка процесса сорбции использовали метод определения порядка реакции по времени полупревращения, который заключается в построении графика зависимости  $\ln(t^{1/2}) = f(\ln C_0)$  (рис. 4).

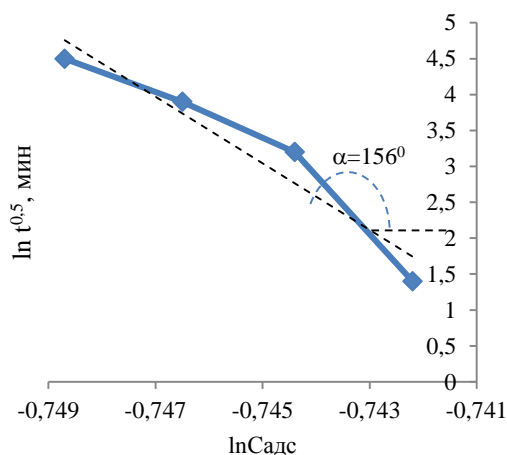


Рис. 4. Определение порядка процесса сорбции по зависимости времени полупревращения от начальной концентрации  
Fig. 4. Determination of the sorption process order according to the dependence of the half-conversion time on the initial concentration

Порядок процесса сорбции рассчитывается по формуле (1), исходя из построенного графика:

$$n = -\text{tga} + 1 \quad (1)$$

Из рис. 4 следует, что тангенс угла наклона составляет  $156^\circ$ . Подставляя полученное значение

тангенса в формулу (1), определили порядок реакции, величина которого оказалась равна 1,4. Поскольку порядок реакции оказался дробным, то для расчета константы скорости использовали формулу (2):

$$k = \frac{2^{n-1}-1}{t^{0.5(n-1)} \cdot C_0^{n-1}} \quad (2)$$

Константа скорости оказалась равна  $10,7 \cdot 10^{-3}$ .

Аналогично определили порядок процесса сорбции и константы скорости сорбции для модифицированных образцов глинистого материала. Результаты переведены в таблице.

Таблица

Рассчитанные кинетические характеристики процесса сорбции

Table. Calculated kinetic characteristics of the sorption process

№	Образец глины	Порядок процесса сорбции	Угол наклона зависимости времени полупревращения	Константа скорости, л/г·с
1	не обработанный	1,4	156	$10,7 \cdot 10^{-3}$
2	обработанный кислотой	1,34	161	$21,2 \cdot 10^{-3}$
3	обработанный щелочью	1,32	162	$15,2 \cdot 10^{-3}$

Значения констант скорости показывают, что химическая модификация ускоряет сорбцию катионного розового 2С глинистым материалом (кислотная – в 1,98 раза, а щелочная – 1,42 раза).

ВЫВОДЫ

При проведении кинетических исследований установлено, что сорбционная способность глинистых материалов достигает высоких значений (80-96%), что говорит об эффективном массопереносе молекул красителя в сорбент. Щелочная и кислотная модификации сорбентов в значительной степени влияют на сорбционный процесс, увеличивая скорость реакции и сорбционную способность. Смешанно-диффузионный режим позволяет полагать, что молекулы сорбируемого вещества проникают не только к сорбирующей поверхности поглотителя, но и вглубь к порам сорбента. Из-за хорошей пористости данный материал можно рассматривать как перспективу использования в промышленных масштабах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Фатьянова Е.А., Мальцева В.С., Бурькина О.В.** // *Изв. Юго-Запад. гос. ун-та. Сер.: Техника и технологии.* 2012. № 2-3. С. 270-274.
2. **Куленцан А.Л., Марчук Н.А.** // *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2022. Т. 65. Вып. 9. С. 129-137. DOI: 10.6060/ivkkt.20226509.6619.
3. **Зеленкова Т.И., Хоботова С.Н., Мальцева В.С., Бурькина О.В.** // Матер. Всеросс. науч.-практ. конф. 13-15 марта 2006 г. Курск: Курск. гос. сельскохозяйств. акад. им. проф. И.И. Иванова. 2006. С. 178-180.
4. **Когановский А.М., Клименко Н.А.** Очистка и использование сточных вод в промышленном водоснабжении. М.: Химия. 1993. 288 с.
5. **Ксенофонтов Б.С.** Проблемы очистки вод. М.: Знание. 1991. 34 с.
6. **Фролова Н.В., Пыхова О.О., Сазонова А.В.** // Молодежь и XXI век - 2012: матер. IV Междунар. молодеж. науч. конф. 23-25 апреля 2012 г. Курск: ЗАО «Университ. книга». 2012. С. 231-233.
7. **Ефремова А.Н., Бурькина О.В.** // Матер. Междунар. науч.-практ. конф. студ., асп. и молод. уч. «Фундаментальные и прикладные исследования в области химии и экологии». Юго-Запад. гос. ун-т. 2015. С. 195-196.
8. **Шумилова М.А., Петров В.Г.** // *Сорбц. и хроматограф. процессы.* 2022. Т. 22. № 2. С. 173-182. DOI: 10.17308/sorpchrom.2022.22/9222.
9. **Яковлева А.А., Нгуен Ч.Т.** // *Сорбц. и хроматограф. процессы.* 2022. Т. 22. № 2. С. 183-192. DOI: 10.17308/sorpchrom.2022.22/9223.
10. **Семенович А.В., Лоскутов С.Р.** // *Химия растит. сырья.* 2004. № 3. С. 121-125.
11. **Афолина А.П., Махрамов И.А., Бурькина О.В.** // Сб. науч. ст. 7-й Междунар. молодеж. науч. конф. «Будущее науки - 2019». 2019. С. 237-240.
12. **Артемьянов А.П., Земскова Л.А.** // *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2019. Т. 62. Вып. 6. С. 138-144.
13. **Шабельская Н.П., Егорова М.А., Арзуманова А.В.** // *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2021. Т. 64. Вып. 2. С. 95-102.
14. **Котельников Д.Д., Конохов А.И.** Глинистые минералы осадочных пород. М.: Недра. 1986. 247 с.
15. **Комаров В.С.** Адсорбенты и их свойства. М.: Наука и техника. 1977. 248 с.
16. **Афолина А.П., Бурькина О.В.** // Матер. Всеросс. науч.-практ. конф. «Формирование профессиональной направленности личности специалистов – путь к инновационному развитию России». 2019. С. 18-21.
17. **Оспанова А.К., Бекисанова Ж.Б., Балтабаева Б., Рахматуллаева Д.Т.** // *Горение и плазмохимия.* 2021. Т. 19. № 3. С. 199-207.
18. **Афолина А.П., Махрамов И.А., Бурькина О.В.** // Сб. матер. Междунар. науч.-практ. конф. «Научные достижения 2019». 2019. С. 212-216.
19. **Гатилова О.В., Бурькина О.В.** // Матер. междунар. науч.-практ. конф. студ., асп. и молод. уч. «Фундаментальные и прикладные исследования в области химии и экологии». Юго-Запад. гос. ун-т. 2015. С. 166-168.
20. **Liu Q.S., Zheng T., Wang P.** // *Chem. Eng. J.* 2010. V. 157. N 2-3. P. 348-356. DOI: 10.1016/j.cej.2009.11.013.
21. **Afonina A.P., Burykina O.V.** // *Russ. J. Phys. Chem. A.* 2022. 96. 3. P. 633 – 636. DOI: 10.1134/S0036024422030025.

## REFERENCES

1. **Fatyanova E.A., Maltseva V.S., Burykina O.V.** // *Izv. Yugo-Zapad. Gos. Un-ta. Ser.: Tekhnika Tekhnologii.* 2012. N. 2-3. P. 270-274 (in Russian).
2. **Kulentsan A.L., Marchuk N.A.** // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.].* 2022. V. 65. N 9. P. 129-137 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20226509.6619.
3. **Zelenkova T.I., Khobotova S.N., Maltseva V.S., Burykina O.V.** // Problems of development of the agricultural sector of the region. Materials of the All-Russian Scientific and Practical conference. March 13-15, 2006. Kursk: Kursk. Gos. selkhoz. Akad. named after Prof. I.I. Ivanov. 2006. P. 178-180 (in Russian).
4. **Koganovsky A.M., Klimenko N.A.** Purification and use of wastewater in industrial water supply. M.: Khimiya. 1993. 288 p. (in Russian).
5. **Ksenofontov B.S.** Problems of water purification. M.: Znanie. 1991. 34 p. (in Russian).
6. **Frolova N.V., Pykhova O.O., Sazonova A.V.** // Youth and the XXI Century - 2012: materials of the IV International Youth Scientific Conference, 23-25 April 2012. Kursk: ZAO "Univers. kniga". 2012. P. 231-233 (in Russian).
7. **Efremova A.N., Burykina O.V.** // Materials of the International scientific and practical conference of students, postgraduates and young scientists "Fundamental and applied research in chemistry and ecology". Southwestern State University. 2015. P. 195-196 (in Russian).
8. **Shumilova M.A., Petrov V.G.** // *Sorbts. Khromatograf. Protsessy.* 2022. V. 22. N 2. P. 173-182 (in Russian). DOI: 10.17308/sorpchrom.2022.22/9222.
9. **Yakovleva A.A., Nguyen C.T.** // *Sorbts. Khromatograf. Protsessy.* 2022. V. 22. N 2. P. 183-192 (in Russian). DOI: 10.17308/sorpchrom.2022.22/9223.
10. **Semenovich A.V., Loskutov S.R.** // *Khim. Rastit. Syr'ya.* 2004. N 3. P. 121-125 (in Russian).
11. **Afonina A.P., Mahramov I.A., Burykina O.V.** // Collection of scientific articles of the 7th International Youth Scientific Conference "The Future of Science - 2019". 2019. P. 237-240 (in Russian).
12. **Artemyanov A.P., Zemskova L.A.** // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.].* 2019. V. 62. N 6. P. 138-144 (in Russian).
13. **Shabelskaya N.P., Egorova M.A., Arzumanova A.V.** // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.].* 2021. V. 64. N 2. P. 95-102 (in Russian).
14. **Kotelnikov D.D., Konyukhov A.I.** Clay minerals of sedimentary rocks. M.: Nedra. 1986. 247 p. (in Russian).
15. **Komarov V.S.** Adsorbents and their properties. M.: Nauka i tekhnologiya. 1977. 248 p. (in Russian).
16. **Afonina A.P., Burykina O.V.** // Materials of the All-Russian scientific and practical conference "Formation of the professional orientation of the personality of specialists - the way to innovative development of Russia". 2019. P. 18-21 (in Russian).
17. **Ospanova A.K., Bekisanova Zh.B., Baltabaeva B., Rakhmatullaeva D.T.** // *Gorenie Plasmochem.* 2021. V. 19. N 3. P. 199-207 (in Russian).
18. **Afonina A.P., Mahramov I.A., Burykina O.V.** // Collection of materials of the international scientific and practical conference "Scientific achievements 2019". 2019. P. 212-216 (in Russian).
19. **Gatilova O.V., Burykina O.V.** // Materials of the International scientific and practical conference of students, postgraduates and young scientists "Fundamental and applied research in chemistry and ecology". Southwestern State University. 2015. P. 166-168 (in Russian).
20. **Liu Q.S., Zheng T., Wang P.** // *Chem. Eng. J.* 2010. V. 157. N 2-3. P. 348-356. DOI: 10.1016/j.cej.2009.11.013.
21. **Afonina A.P., Burykina O.V.** // *Russ. J. Phys. Chem. A.* 2022. 96. 3. P. 633 – 636. DOI: 10.1134/S0036024422030025.

Поступила в редакцию (Received) 29.11.2022

Принята к опубликованию (Accepted) 14.06.2023